

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В.Н.КАРАЗИНА**

**ЧЕБОТАРЁВ В.И., ДУМИН А.Н., ЛЯХОВСКИЙ А.Ф.**

# **СХЕМОТЕХНИКА УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ**

Учебно-методическое пособие  
по схемотехнике радиоэлектронных устройств  
для самостоятельной работы студентов  
физических специальностей

**ХАРЬКОВ – 2004**

УДК 261.375

ББК

Че

**Чеботарёв В.И., Думин А.Н., Ляховский А.Ф. Схемотехника усилительных каскадов.**/Под ред. В.И. Чеботарёва. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2004. – 30 с.

В пособии рассмотрены принцип электронного усиления сигналов, состав усилительных каскадов и их схемотехника. Для приобретения навыков чтения схем приведен ряд схемотехнических решений различных разновидностей усилительных каскадов, сформулированы задания для самостоятельной работы.

Пособие предназначено для студентов физических специальностей и используется при изучении курса «Основы радиоэлектроники».

#### **Рецензенты:**

ст. науч. сотрудник ИРЭ НАН Украины им. О.Я. Усикова доктор. физ.-мат. наук, проф. А.А. Булгаков ;

зав. Отд. космической радиофизики РИ НАН Украины, доктор физ.-мат. наук, проф. А.А. Минаков.

*Рекомендовано ученым советом радиофизического факультета Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. (Протокол №2 от \_\_.02.04)*

## 1. Состав усилительных каскадов

**Усиление сигналов** – важнейший процесс в радиоэлектронике. Он заключается в **увеличении энергии информационных сигналов**. Если при этом входной и выходной сигналы связаны линейной зависимостью, то усиление называют *линейным*.

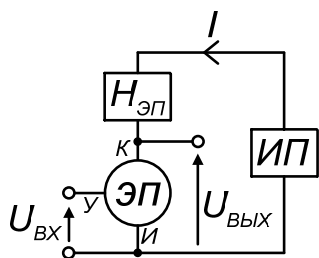


Рис. 1

**Принцип электронного усиления** заключается в управлении посредством электронных приборов электрическими токами и напряжениями, создаваемыми сторонним источником энергии – источником питания.

Элементарная усилительная цепь, обобщённая схема которой представлена на рис.1, состоит из электронного прибора ЭП, его нагрузки  $H_{ЭП}$  и источника питания ИП, которые образуют замкнутую цепь – контур. Величина тока  $I$  в контуре регулируется электронным прибором в зависимости от входного сигнала – входного напряжения  $U_{ВХ}$ . Посредством нагрузки электронного прибора  $H_{ЭП}$  изменение тока преобразуется в выходной сигнал – напряжение  $U_{ВЫХ}$ . Энергия, которую способен выделить выходной сигнал, превосходит энергию входного сигнала, затраченную на управление электронным прибором. Простейшие усилительные цепи обычно называют *усилительными каскадами (усилительными ступенями)*.

Укажем основные свойства главных частей каждого усилительного каскада.

**Электронный прибор (ЭП)** – управляемая резистивность, регулирующая ток  $I$ . Разновидность ЭП и его тип выбирают учитывая *энергетические и спектральные характеристики сигналов*. Резистивные свойства ЭП доминируют в ограниченном сверху диапазоне частот, характерном для каждого типа приборов. С ростом частоты начинают проявляться особенности физических процессов и конструкции ЭП, придающие ему, помимо резистивных, и ёмкостные свойства. Разновидности ЭП, используемые в усилительных каскадах приведены в табл.1. Здесь же указаны знаки полярностей напряжений на электродах ЭП относительно *инжекторного* электрода, при которых возможен линейный режим работы ЭП, а также представлен вид статических *вольт-амперных характеристик (ВАХ): входных, выходных и проходных*.

**Нагрузка электронного прибора  $H_{ЭП}$**  преобразует изменение тока в **выходной сигнал**. Как правило, им является напряжение  $U_{ВЫХ}$ . И только в конечных ступенях усиления сигнал – это ток  $I_{ВЫХ}$ , возбуждающий конечное устройство. Выбор нагрузки ЭП определяется целями и спектральными характеристиками усиливаемых сигналов. На рис.2 представлены радиоэлементы и их соединения, используемые в усилительных ступенях в качестве нагрузок электронных приборов.

Таблица 1

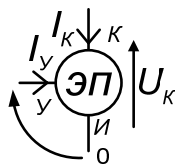
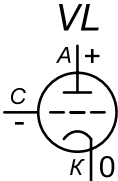
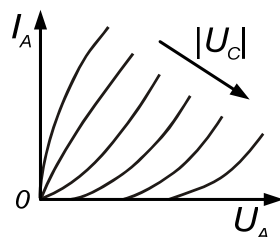
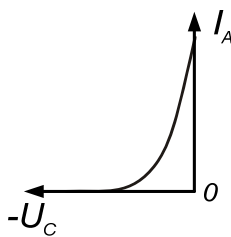
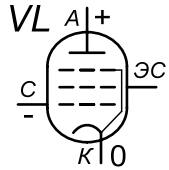
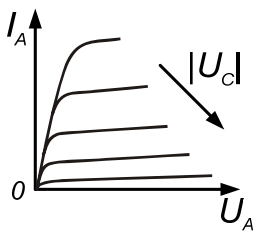
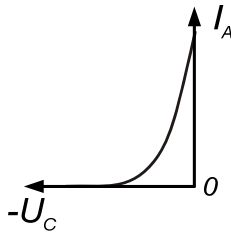
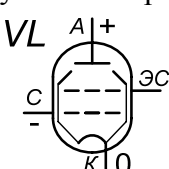
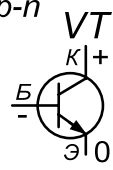
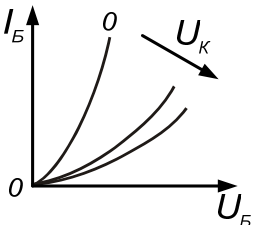
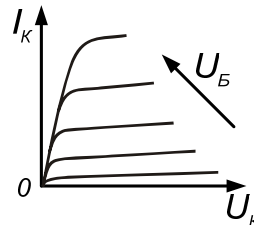
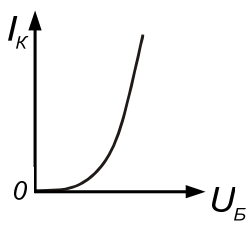
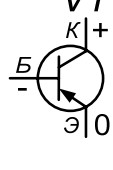
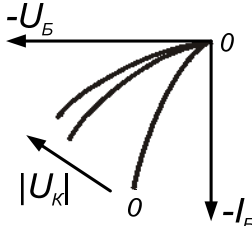
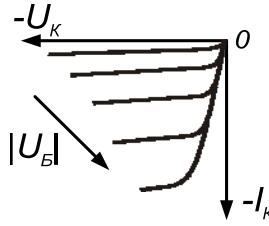
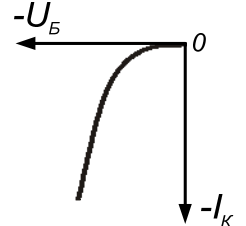
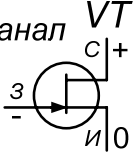
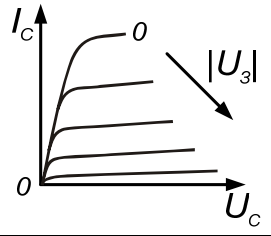
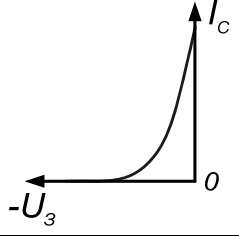
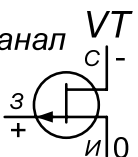
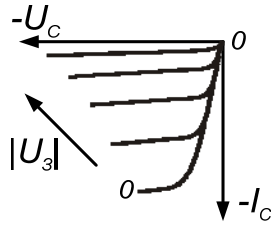
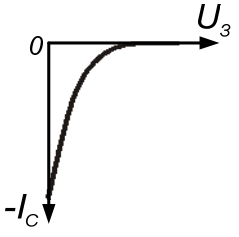
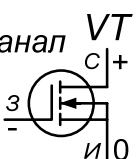
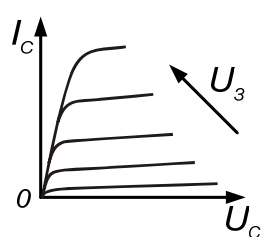
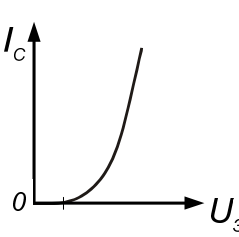
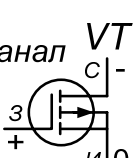
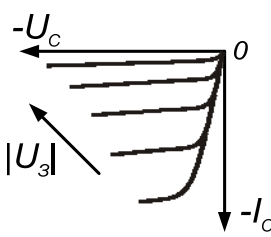
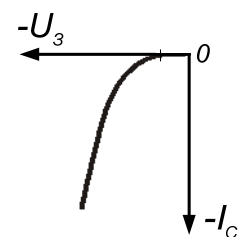

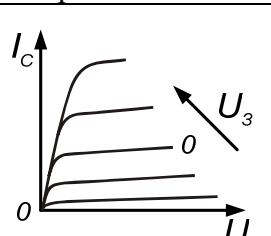
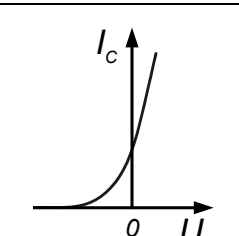

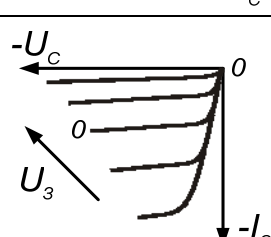
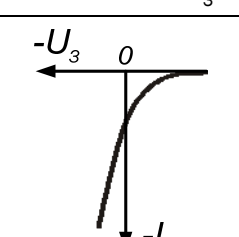
Условное обозначение ЭП	Вольт-амперные характеристики		
	входная	выходная	проходная
	Обобщенный электронный прибор (электроды: инжекторный (И), управляющий (У), коллекторный (К))		
	График зависимости: $I_U(U_U, U_K)$	График зависимости: $I_K(U_U, U_K)$	График зависимости: $I_K(U_U)$
Триод 	Электронные лампы (электроды: катод (К), управляющая сетка (УС), анод (А), экранирующая сетка (ЭС))		
	$I_C=0$ (при $U_K<0$ )		
Пентод 	$I_C=0$ (при $U_K<0$ )		
Лучевой тетрод 			
$n-p-n$ 	Биполярные транзисторы (электроды: эмиттер (Э), база (Б), коллектор (К))		
			
$p-n-p$ 			

Таблица 1 (продолжение)

Условное обозначение ЭП	Вольт-амперные характеристики		
	входная	выходная	проходная
Полевые транзисторы (электроды: исток ( <i>И</i> ), затвор ( <i>З</i> ), сток ( <i>С</i> ), подложка ( <i>П</i> ))			
Полевые транзисторы с управляющим <i>p-n</i> переходом			
<p><i>n</i>-канал VT</p> 	$I_3=0$ (при $U_3<0$ )		
<p><i>p</i>-канал VT</p> 	$I_3=0$ (при $U_3>0$ )		
Полевые транзисторы с индуцированным каналом			
<p><i>n</i>-канал VT</p> 	$I_3=0$		
<p><i>p</i>-канал VT</p> 	$I_3=0$		
Полевые транзисторы с встроенным каналом			
<p><i>n</i>-канал VT</p> 	$I_3=0$		
<p><i>p</i>-канал VT</p> 	$I_3=0$		

**Источник питания ИП** – это источник постоянного напряжения  $U_{п.}$ . Его энергия преобразуется в энергию выходного сигнала. Величина  $U_{п.}$  и полярность подключения источника определяется величиной (уровнем) сигнала и выбором типа ЭП. При анализе усилительных каскадов источники питания чаще всего представляют идеальными источниками напряжения, поскольку внутреннее сопротивление реальных источников питания мало.

В составе усилительных каскадов, наряду с основными, имеются вспомогательные элементы. С их помощью задаются исходные значения величин постоянных напряжений и токов электродов ЭП в отсутствие входного сигнала, т.е. его режим покоя, обеспечивается стабилизация этого режима, осуществляется связь со смежными цепями и развязка каскадов по цепи питания. К числу вспомогательных элементов относятся: блокирующие и разделительные конденсаторы –  $C_{бл}$  и  $C_p$ , резистивные делители напряжения –  $R_1$ ,  $R_2$ , дроссели –  $L_{др}$ , трансформаторы и т.п. Фрагменты схем усилительных ступеней, содержащие вспомогательные элементы представлены на рис.3 и рис.4.

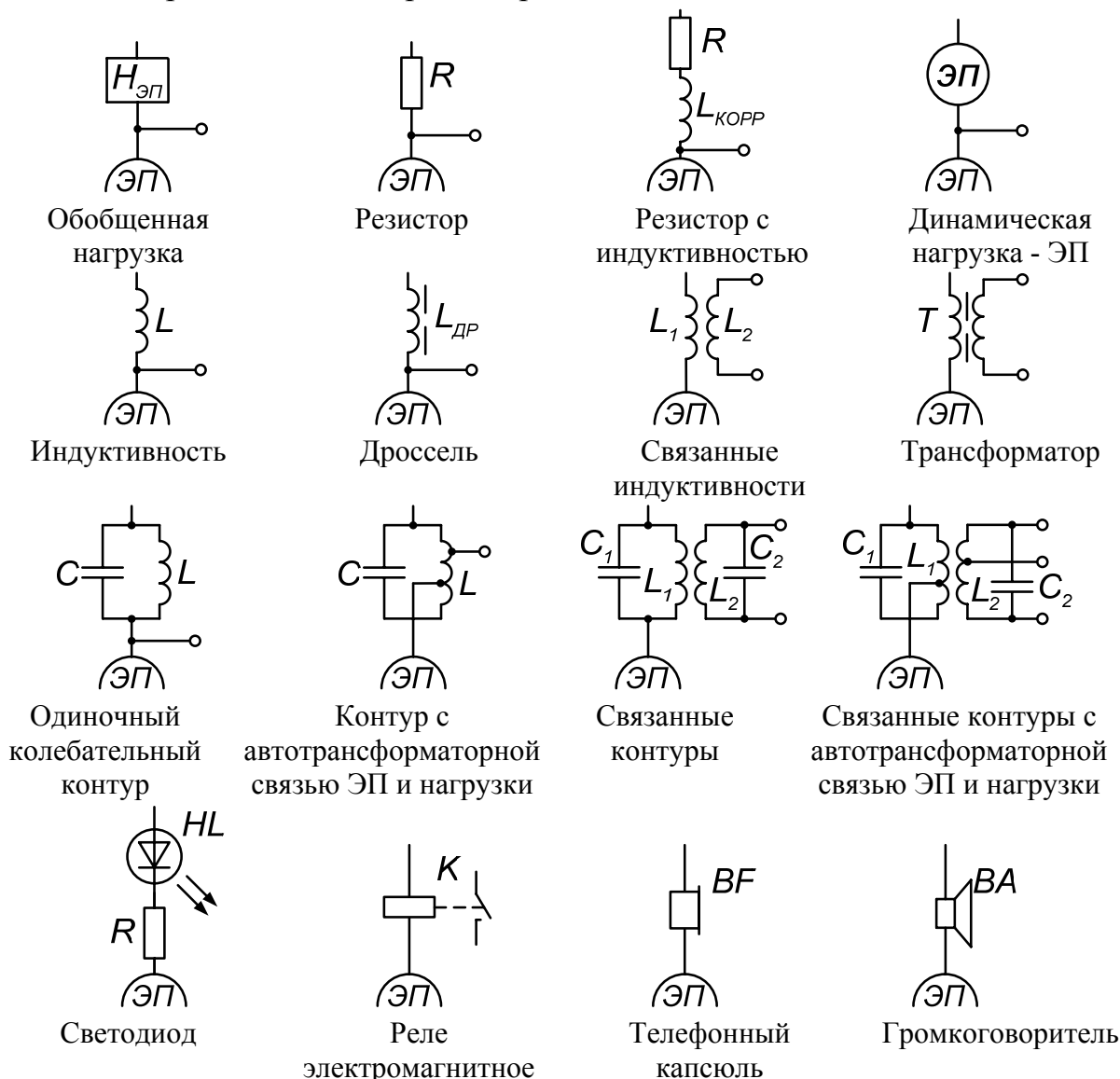


Рис. 2 Нагрузки электронных приборов

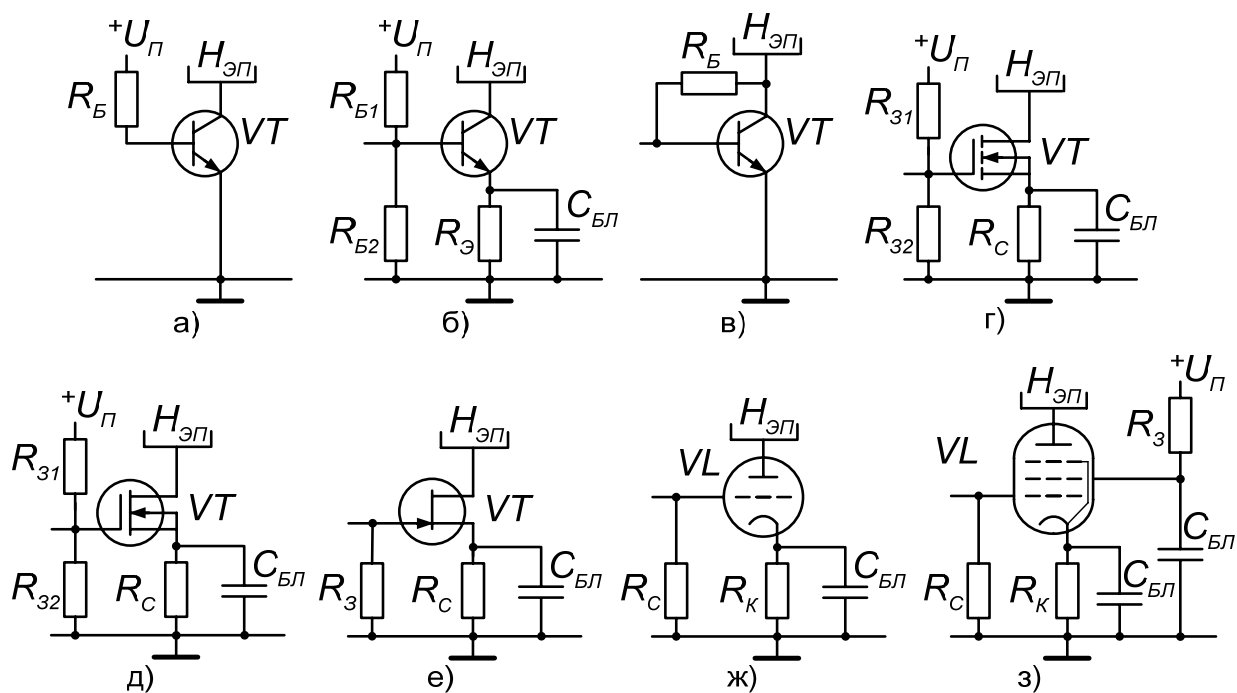


Рис.3. Схемы формирования режима покоя каскада и его стабилизации:

а) – в) каскады на биполярных транзисторах с общим эмиттером,

г) – е) каскады на полевых транзисторах с общим истоком,

ж) – з) каскады на электронных лампах с общим катодом

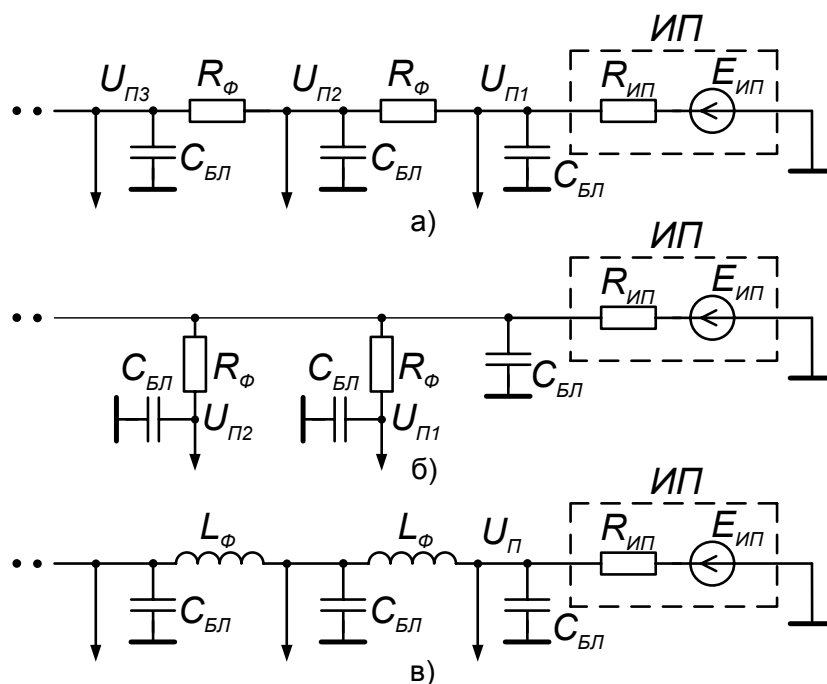


Рис.4. Схемы развязки каскадов по цепи питания:

а), б) резистивные ( $RC$ -фильтры низких частот),

в) индуктивные ( $LC$ -фильтры низких частот)

### ***Задания для самостоятельной работы***

1. Усвоить принцип электронного усиления. В рабочей тетради для самостоятельной работы используя рис.1 начертить и запомнить обобщенную схему усилительной цепи (усилительного каскада).
2. Используя таблицу 1 начертить и запомнить условные графические обозначения электронных приборов (ЭП), применяемых в усилителях. Указать знаки полярности напряжений, прикладываемых к электродам ЭП относительно инжекторного электрода, при которых возможен линейный режим работы ЭП. Начертить ВАХ ЭП.
3. Используя рис.2 начертить и запомнить условные графические обозначения радиоэлементов, применяемых в качестве нагрузки ЭП.
4. Используя рис.3 начертить и запомнить схемы, обеспечивающие формирование и стабилизацию режима покоя каскадов, выполненных на различных ЭП.
5. Используя рис.4 начертить и усвоить схемы цепей развязки усилительных каскадов по цепи питания.

### ***Контрольные вопросы***

1. Какова суть процесса усиления сигналов? При каком условии усиление называют линейным?
2. Перечислите основные части элементарной усилительной цепи.
3. Как происходит процесс усиления сигналов?
4. Укажите основное назначение ЭП в усилительной цепи. Перечислите разновидности ЭП.
5. Укажите назначение в усилительной цепи нагрузки ЭП. Перечислите их разновидности.
6. Укажите назначение источника питания.
7. Укажите назначение вспомогательных элементов и цепей в усилителях.





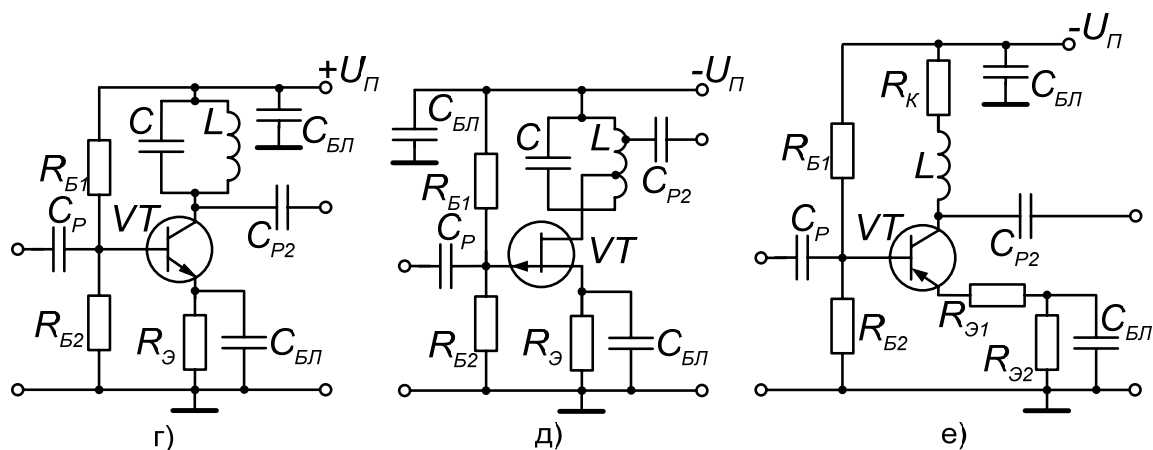


Рис.5 Схемы каскадов с общим инжекционным электродом (продолжение):

- г) резонансный усилитель на биполярном транзисторе,  
 д) резонансный усилитель на полевом транзисторе с автотрансформаторной связью с колебательным контуром,  
 е) широкополосный усилитель на биполярном транзисторе

### ***Задания для самостоятельной работы***

1. Усвоить свойства усилительных каскадов с общим инжекционным электродом.
2. В рабочей тетради для самостоятельной работы начертить ряд схем таких каскадов используя все разновидности ЭП, представленные в таблице 1, разновидности нагрузок ЭП, представленные на рис.2 и схемы формирования режима покоя ЭП, представленные на рис.3.

## **2.2. Каскады с общим коллекторным электродом**

Такие каскады не инвертируют сигнал, а их коэффициент передачи сигнала по напряжению близок к единице. Поэтому их называют *повторителями*. Высокое входное и низкое выходное сопротивления повторителей определили их широкое использование в качестве входных, буферных и выходных каскадов радиоэлектронных устройств. Глубокая отрицательная обратная связь, присущая повторителям, подавляет частотную зависимость сопротивления нагрузки электронного прибора  $H_{ЭП}$ , поэтому чаще всего нагрузкой является резистор. На рис.6 приведены обобщенная схема и примеры повторителей.

### ***Задания для самостоятельной работы***

1. Усвоить свойства усилительных каскадов с общим коллекторным электродом.
2. В рабочей тетради для самостоятельной работы начертить ряд схем таких каскадов используя все разновидности ЭП, представленные в таблице 1.

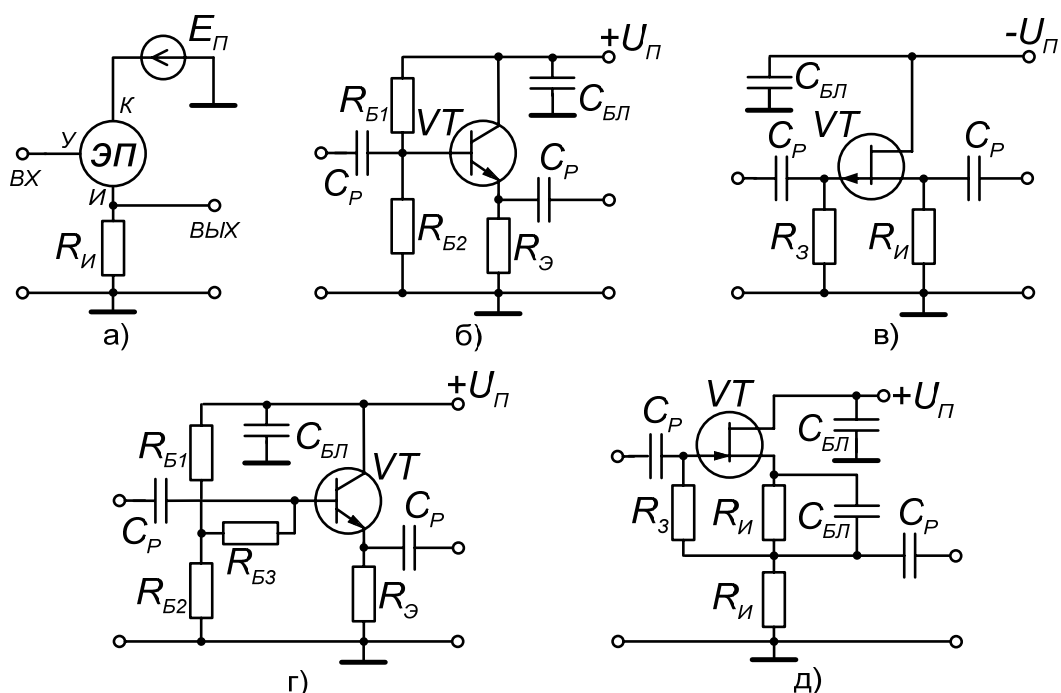


Рис.6. Схемы каскадов с общим коллекторным электродом (повторителей):

- а) обобщенная схема,
- б) повторитель на биполярном транзисторе,
- в) повторитель на полевом транзисторе,
- г) повторитель на биполярном транзисторе с повышенным входным сопротивлением,
- д) повторитель на полевом транзисторе с повышенным входным сопротивлением,

### 2.3. Каскады с общим управляющим электродом

У этих схем входное сопротивление является низким, а выходное сопротивление и величина коэффициента усиления такие же, как и у схем с общим инжекторным электродом. Однако, в отличие от последних они не инвертируют сигнал и обладают тем преимуществом, что из межэлектродных ёмкостей на их работу влияет только емкость между инжекторным и управляющим электродами ЭП  $C_{иу}$ . Это расширяет частотный диапазон усиления и определяет широкое использование таких каскадов для усиления высокочастотных сигналов. Схемы каскадов с общим управляющим электродом приведены на рис.7.

#### *Задания для самостоятельной работы*

1. Усвоить свойства усилительных каскадов с общим управляющим электродом.
2. В рабочей тетради для самостоятельной работы начертить ряд схем таких каскадов используя разновидности ЭП, представленные в таблице 1.

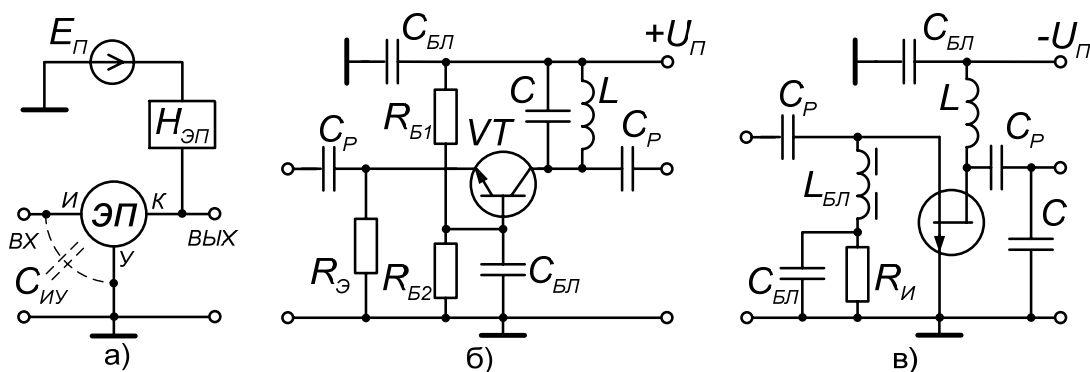


Рис.7 Схемы каскадов с общим управляющим электродом:

- а) обобщенная схема каскада,
- б) резонансный усилитель на биполярном транзисторе,
- в) резонансный усилитель на полевом транзисторе

## 2.4. Каскады с разделённой нагрузкой

В этих усилительных схемах сочетаются свойства инвертирующих каскадов (п. 2.1) и повторителей (п. 2.2). Их используют для получения двух копий сигналов, отличающихся полярностью (знаком), и называют *фазоинверторами*. Схеме присуща глубокая отрицательная обратная связь, поэтому, как и у повторителей, в ней в качестве нагрузок ЭП используют резисторы, а коэффициент передачи сигнала по напряжению в инжекторное плечо близок к единице. Коэффициент передачи сигнала по напряжению в коллекторное плечо отличается от него знаком и может иметь ту же величину. Входное сопротивление каскада может достигать высоких значений, а выходные – определяются величинами сопротивлений нагрузки ЭП  $R_{\text{Э}}$  и  $R_{\text{К}}$ . Схемы каскадов с разделённой нагрузкой приведены на рис.8.

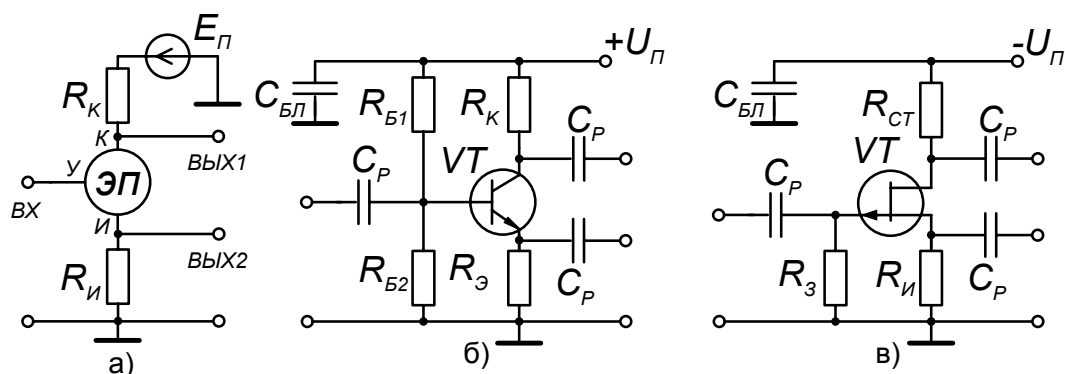


Рис.8 Схемы каскадов с разделенной нагрузкой (фазоинверторов):

- а) обобщенная схема каскада,
- б) фазоинвертор на биполярном транзисторе,
- в) фазоинвертор на полевом транзисторе

### Задание для самостоятельной работы

1. Усвоить свойства усилительных каскадов с разделенной нагрузкой.
2. В рабочей тетради для самостоятельной работы начертить ряд схем таких каскадов используя разновидности ЭП, представленные в таблице 1.

### 2.5. Каскодные усилители

Каскодный усилитель, обобщенная схема которого представлена на рис.9а, по существу является модификацией каскада с общим инжекционным электродом (п.2.1.рис.5а). В его составе имеются два электронных прибора: основной ЭП<sub>1</sub>, включенный по схеме с общим инжекционным электродом и вспомогательным ЭП<sub>2</sub>, включенный по схеме с общим управляющим электродом. Вспомогательный ЭП<sub>2</sub> фактически выполняет роль экрана, разделяющего основной ЭП<sub>1</sub> и его нагрузку Н<sub>ЭП</sub>.

Таким образом, каскодная схема подобно схеме с общим инжекционным электродом может иметь большое входное сопротивление и высокий коэффициент усиления и, при этом, подобно схеме с общим управляющим электродом, она имеет минимальную проходную ёмкость. Каскодные схемы применяют при усилении высокочастотных сигналов.

Схемы каскодных усилителей приведены на рис.9.

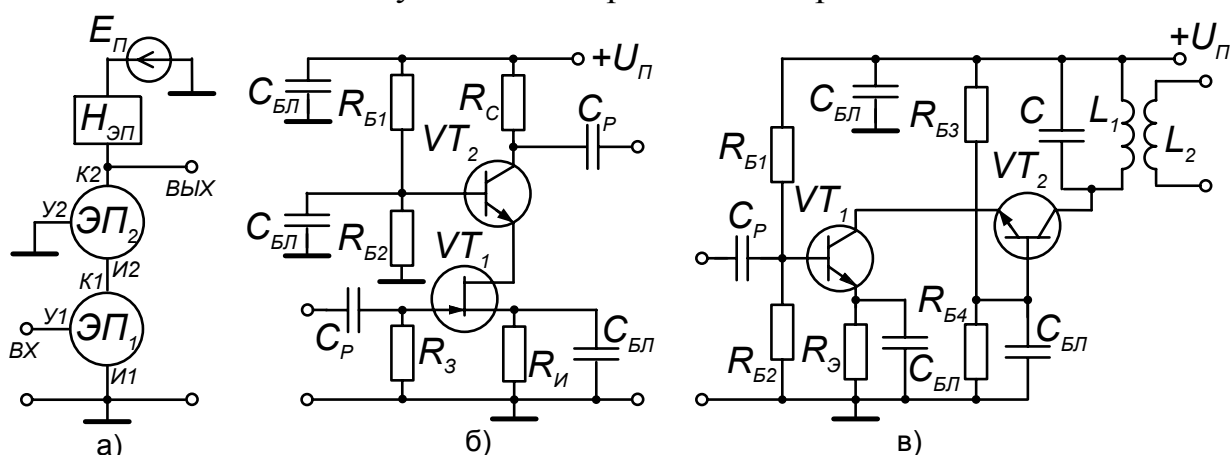


Рис.9. Схемы каскодных усилителей:

- а) обобщенная схема,
- б) резисторный каскодный усилитель,
- в) резонансный каскодный усилитель

### Задание для самостоятельной работы

1. Усвоить свойства каскодных усилителей.
2. В рабочей тетради для самостоятельной работы начертить ряд схем таких каскадов используя разновидности ЭП, представленные в таблице 1, разновидности нагрузок ЭП, представленные на рис.2 и схемы формирования режима покоя ЭП, представленные на рис.3.

## 2.6. Каскады с составными транзисторами

Соединения двух транзисторов, представленные на рис.10, имитируют один транзистор с улучшенными параметрами. Такие соединения называют *составными транзисторами* и используют в схемах, работающих с большими токами, например, в выходных каскадах усиления мощности и в стабилизаторах напряжения. Во входных каскадах усилительных схем составные транзисторы используют, когда необходимо обеспечить большое входное сопротивление. Схемы каскадов с составными транзисторами представлены в п. 2.7 и в п. 2.9.

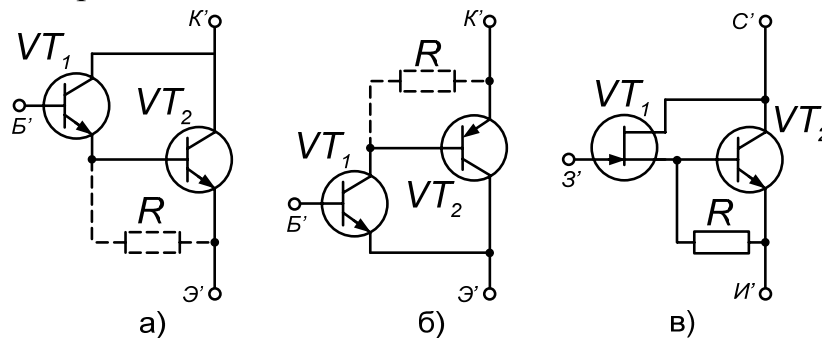


Рис.10. Составные транзисторы:

- а) комбинация биполярных транзисторов с одинаковым типом проводимости,
- б) комбинация биполярных транзисторов с различными типами проводимости,
- в) комбинация полевого и биполярного транзисторов

### *Задание для самостоятельной работы*

1. Усвоить назначение и схемотехнику составных транзисторов.
2. В рабочей тетради для самостоятельной работы начертить схемы соединения транзисторов, образующие составные транзисторы.

## 2.7. Дифференциальные каскады

*Дифференциальный усилительный каскад* обладает большим коэффициентом усиления разностного входного напряжения и нечувствителен к его синфазным составляющим. При высокой симметрии, которая легко достигается в интегральных схемах, каскад нечувствителен к изменениям температуры, пульсациям напряжения источника питания и синфазным сигналам наводки. В настоящее время дифференциальный усилитель является основной схемной конфигурацией, на базе которой строятся многочисленные усилительные схемы. Схемы дифференциальных каскадов приведены на рис.11.

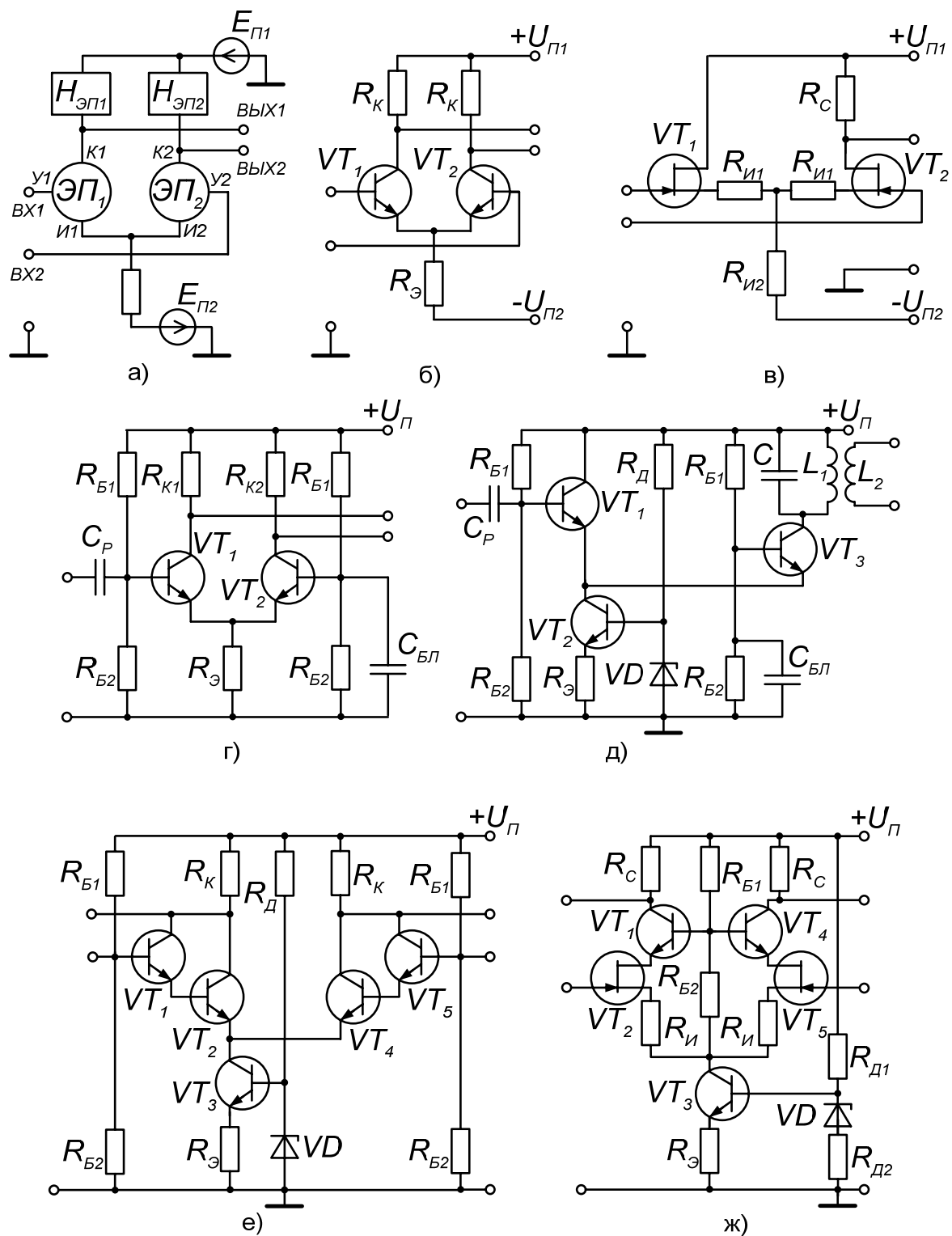


Рис.11. Схемы дифференциальных каскадов:

- а) обобщенная схема,
- б) симметричный дифференциальный усилитель на биполярных транзисторах,
- в) несимметричный дифференциальный усилитель на полевых транзисторах,
- г) фазоинвертор на дифференциальном каскаде,
- д) резонансный усилитель на дифференциальном каскаде,
- е), ж) симметричные дифференциальные усилители на составных транзисторах

### Задание для самостоятельной работы

1. Усвоить свойства дифференциальных усилительных каскадов.
2. В рабочей тетради для самостоятельной работы начертить ряд схем симметричных и несимметричных усилительных каскадов используя разновидности транзисторов, их нагрузок и вспомогательных элементов.

## 2.8. Каскады на операционных усилителях

Операционный усилитель (ОУ) – представляет собой микросхему высококачественного усилителя постоянного тока с дифференциальным входом. ОУ обладает высокими входными сопротивлениями, низким выходным сопротивлением, высоким коэффициентом передачи напряжения разностного сигнала. Благодаря своей дешевизне и миниатюрности ОУ нашли широкое применение в схемотехнике современных радиоэлектронных устройств. В линейных каскадах с ОУ всегда используют глубокую внешнюю отрицательную обратную связь, стабилизирующую характеристики схемы, так, что они практически перестают зависеть от параметров ОУ и определяются только внешними цепями. На рис.12 приведены обобщенные схемы и примеры каскадов с ОУ.

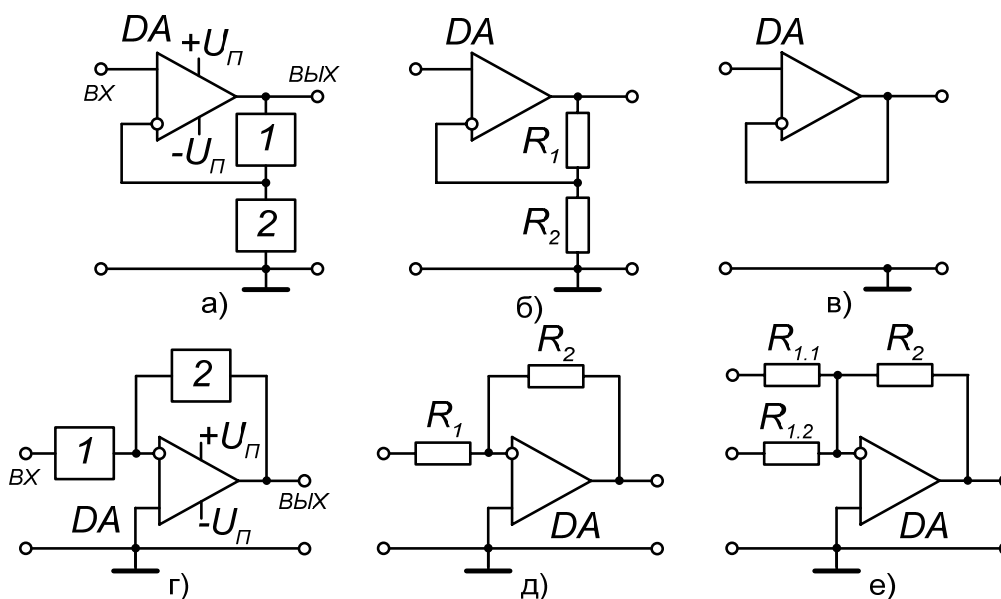


Рис.12. Схемы каскадов на операционных усилителях:

- а) обобщенная схема каскада, неинвертирующего сигналы,
- б) усилитель на ОУ, неинвертирующий сигналы,
- в) повторитель на ОУ,
- г) обобщенная схема каскада, инвертирующего сигналы,
- д) усилитель на ОУ, инвертирующий сигналы,
- е) инвертирующий сумматор на ОУ,



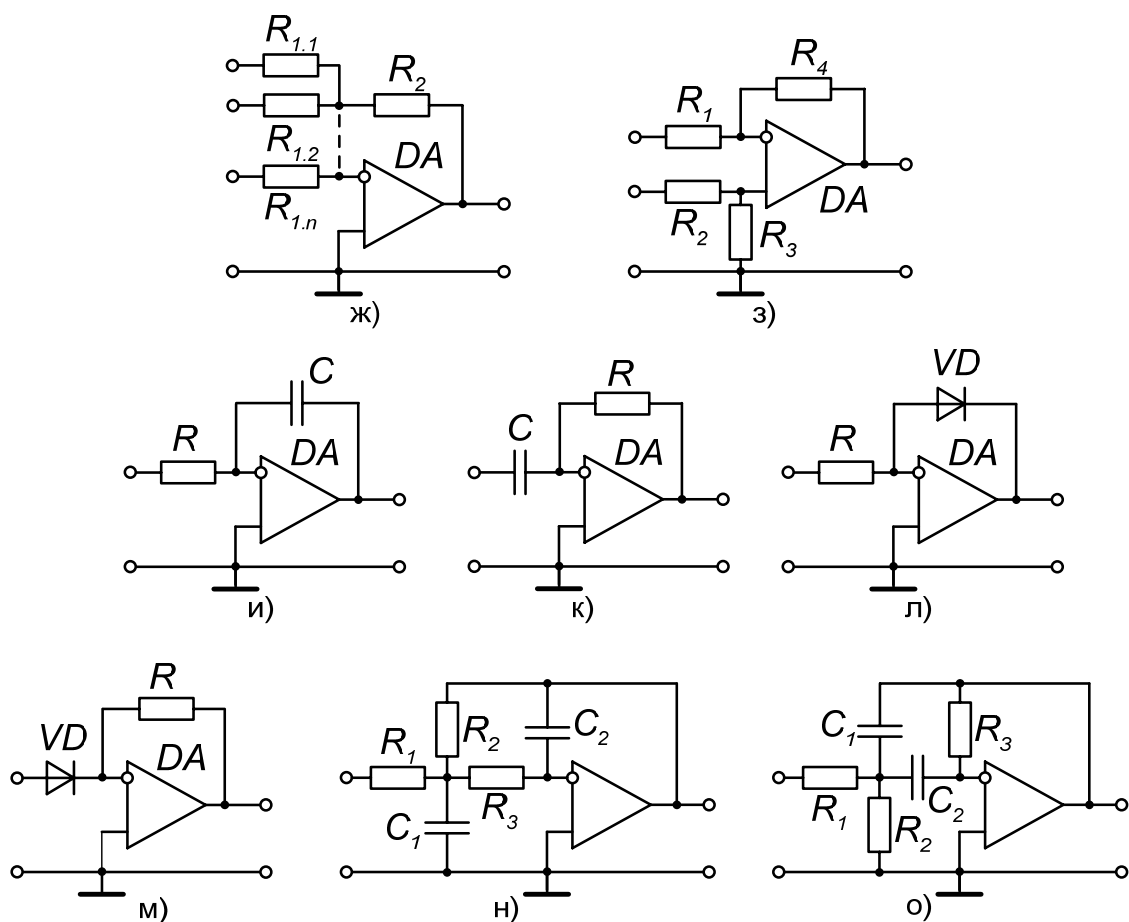


Рис.12. Схемы каскадов на операционных усилителях (продолжение):

- ж) инвертирующий сумматор на ОУ,
- з) усилитель на ОУ, вычитающий сигналы
- и) интегрирующий усилитель на ОУ,
- к) дифференцирующий усилитель на ОУ,
- л) логарифмирующий усилитель на ОУ,
- м) потенцирующий усилитель на ОУ,
- н), о) активные RC-фильтры на ОУ

### ***Задание для самостоятельной работы***

1. Усвоить основные свойства операционных усилителей (ОУ) и принцип их использования в схемотехнике устройств усиления и аналоговой обработки сигналов.

2. В рабочей тетради для самостоятельной работы начертить ряд схем каскадов с ОУ используя примеры, представленные на рис.12.

## **2.9. Оконечные каскады усилителей мощности**

Эти усилительные ступени обеспечивают заданную выходную мощность в оконечной нагрузке. При этом, преобразуя энергию источника питания в переменный ток в нагрузке, они должны обеспечить высокий КПД – отношение мощностей переменного тока в нагрузке и постоянного тока, подводимого от источника питания. Выходная мощность и КПД – важнейшие параметры рассматриваемых усилительных каскадов.

Основой схемотехники усилителей мощности являются каскады с общим инжекторным электродом и каскады с общим коллекторным электродом (п.2.1, п.2.2). В них используют одиночные и составные ЭП, а также их параллельное соединение и двухтактное включение.

Для увеличения КПД используют экономичные режимы работы ЭП, когда часть времени периода колебания ток ЭП равен нулю. Различают следующие режимы работы ЭП: А, В, АВ, С и др.

В режиме работы А ток ЭП никогда не равен нулю, его постоянная составляющая, равная половине максимального тока ЭП, велика, поэтому КПД схемы низок – менее 50%. Из-за этого режим А в усилителях мощности используют сравнительно редко.

В режиме работы В ток ЭП в течение одного полупериода колебания отличен от нуля, повторяя усиливаемый сигнал, а в течение другого полупериода – равен нулю. В режиме работы АВ ток ЭП отличен от нуля в течение промежутка времени большего, чем половина периода колебания. В режиме работы С ток ЭП отличен от нуля в течение промежутка времени меньшего, чем половина периода колебания.

Очевидно, что в режимах работы В, АВ и С появляются сильные нелинейные искажения сигнала. Эти искажения в режимах работы В и С уменьшают, а в режиме работы АВ устраняют применяя двухтактное включение ЭП. При таком включении два ЭП (или две группы ЭП) попеременно работают в активном режиме, поочерёдно усиливая разнополярные составляющие сигнала. При отсутствии входного сигнала в режимах работы В и С оба ЭП заперты, т.е. их ток покоя равен нулю. В режиме работы АВ при отсутствии входного сигнала ток покоя мал. Поэтому, двухтактная схема в режимах работы В, АВ и С обладают существенно более высоким КПД по сравнению с режимом А.

Режим А используют для линейного усиления мощности как высокочастотных так и низкочастотных сигналов. Примеры схем, в которых реализуется указанный режим, приведены на рис.13.

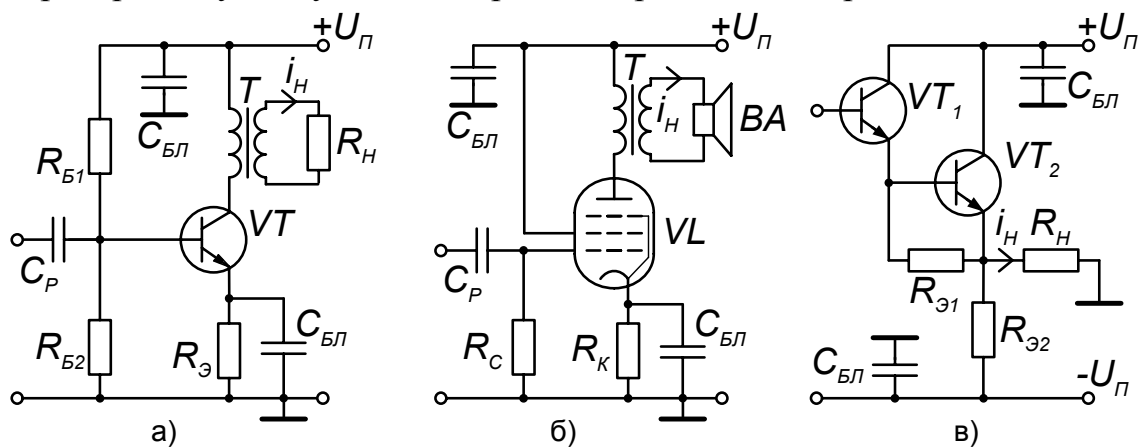


Рис.13 Схемы каскадов усиления мощности в режиме работы А:

- а) усилитель мощности низкочастотных сигналов на биполярном транзисторе,
- б) усилитель мощности низкочастотных сигналов на пентоде,
- в) повторитель на составных биполярных транзисторах

Двухтактным режимам работы В и С присущ излом передаточной характеристики ступени вблизи нуля, что приводит к появлению переходных нелинейных искажений сигналов. При резонансном усилении высокочастотных сигналов (радиосигналов) эти искажения устраняются фильтрующими свойствами резонаторов.

Примеры схем, в которых реализуется двухтактный режим В, приведены на рис.14

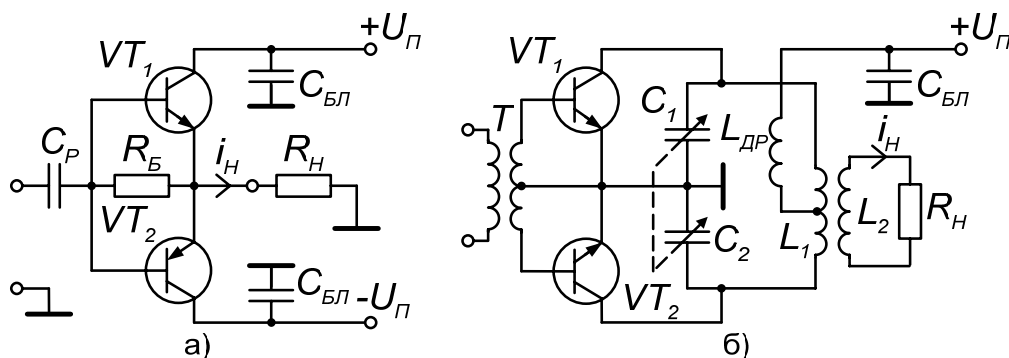


Рис.14. Схемы каскадов усиления мощности в двухтактном режиме работы В:  
а) двухтактный повторитель на комплементарной паре биполярных транзисторов,  
б) двухтактный усилитель мощности радиосигналов на биполярных транзисторах

В двухтактном режиме работы АВ к управляющим электродам ЭП прикладываются напряжения смещения, обеспечивающие небольшие начальные токи ЭП. За счет этого переходные нелинейные искажения в каскаде в достаточной степени уменьшаются. Этот режим находит самое широкое применение в усилителях мощности низкочастотных сигналов. Примеры схем усилителей, в которых реализован режим работы АВ, приведены на рис.15.

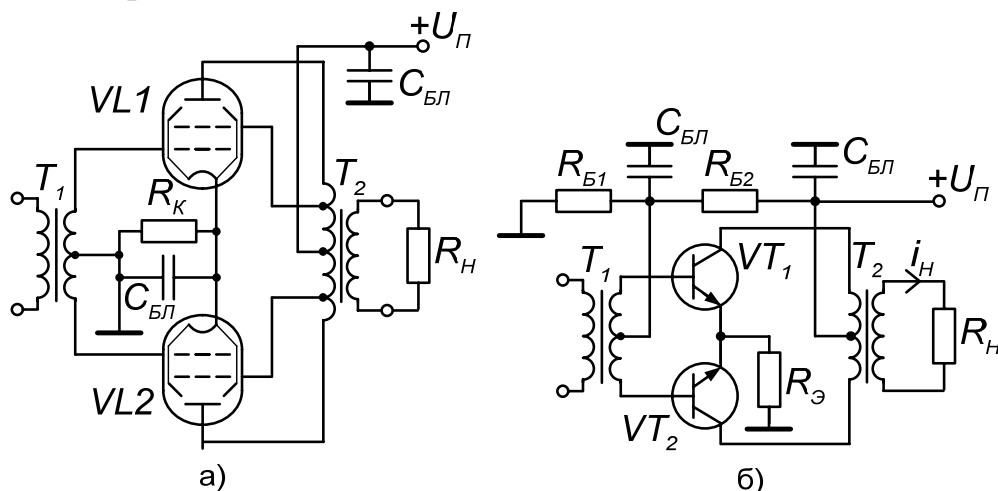


Рис.15. Схема двухтактных трансформаторных усилителей мощности сигналов звуковых частот в режиме работы АВ:  
а) усилитель мощности на лучевых тетрадах,  
б) усилитель мощности на биполярных транзисторах

Усилители мощности звуковых частот имеют особенности, обусловленные: широким частотным и большим динамическим

диапазонами усиливаемых сигналов; высокими требованиями, предъявляемыми к уровню их нелинейных искажений; небольшими сопротивлениями акустических преобразователей (громкоговорителей), которым нередко присущи резонансные явления. Из-за малого выходного сопротивления усилители мощности легко перегружаются и разрушаются, поэтому в них используют схемные решения, ограничивающие максимальную величину выходного тока. Выходные напряжения и выходные токи у этих усилителей являются знакопеременными, поэтому их оконечные каскады часто запитывают от двухполярных источников питания. Все отмеченные особенности обуславливают сложность схемотехники высококачественных усилителей мощности звуковых частот.

В настоящее время для усиления акустических сигналов наиболее распространенными являются каскады, основа которых – работающий в режиме АВ двухтактный повторитель, на комплементарных одиночных или составных транзисторах, дополненный цепями формирования напряжения смещения и схемами ограничения выходного тока. Примеры схем оконечных каскадов усилителей мощности звуковой частоты приведены на рис.16 – рис.18.

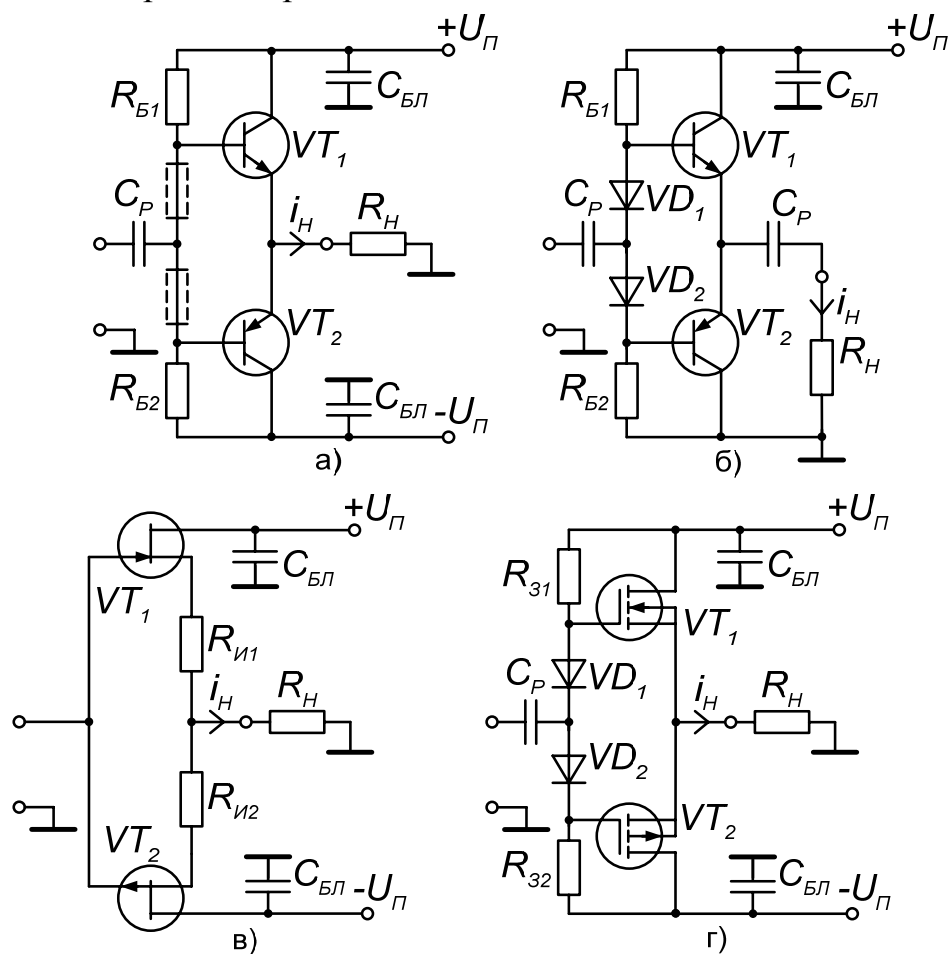


Рис.16. Схемы двухтактных усилителей мощности на комплементарных транзисторах:

- а), б) усилители мощности на биполярных транзисторах,  
в), г) усилители мощности на полевых транзисторах

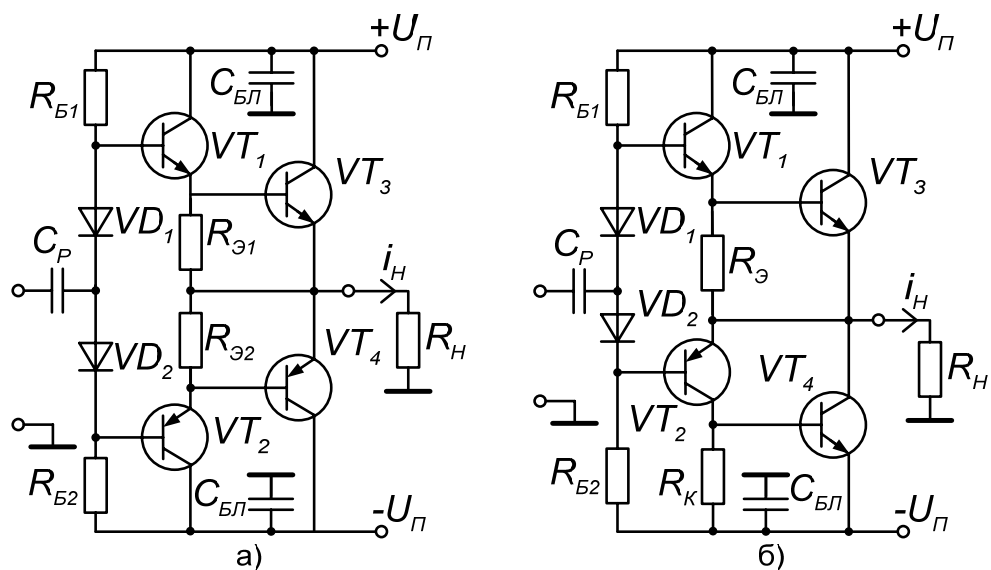


Рис.17. Схемы двухтактных усилителей мощности на составных комплементарных транзисторах

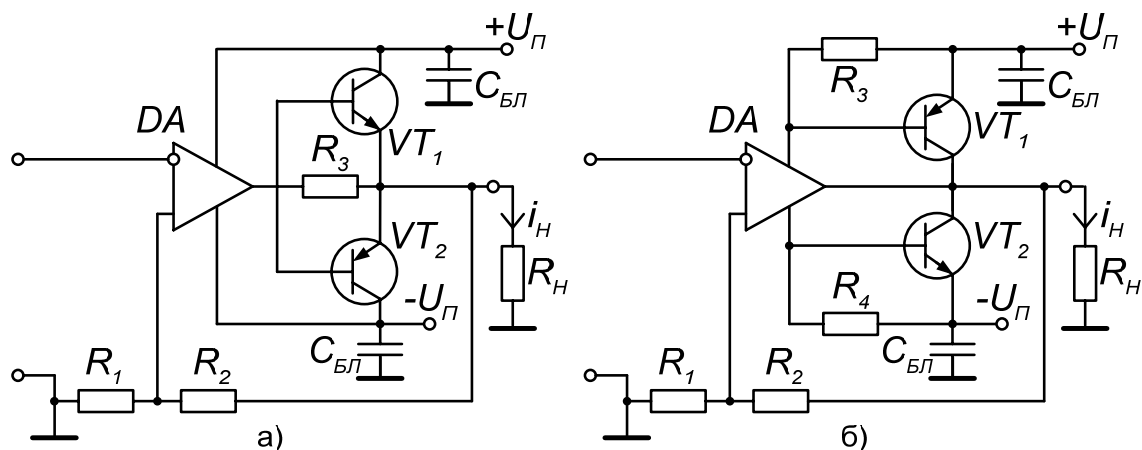


Рис.18. Схемы двухтактных усилителей мощности на комплементарных транзисторах, возбуждаемых операционными усилителями

### *Задания для самостоятельной работы*

1. Усвоить назначение и основные параметры каскадов усиления мощности.
2. Усвоить классификацию режимов работы ЭП в каскадах усиления мощности.
3. Усвоить особенности режима работы А. В рабочей тетради начертить схемы транзисторного и лампового каскадов усиления мощности в этом режиме.
4. Усвоить особенности режима работы В. В рабочей тетради начертить схемы транзисторного и лампового резонансных каскадов усиления мощности в этом режиме.

5. Усвоить особенности режима работы АВ. В рабочей тетради начертить схемы транзисторного и лампового трансформаторных каскадов усиления мощности в этом режиме.

6. Усвоить особенности усиления мощности сигналов звуковых частот. В рабочей тетради начертить ряд схем безтрансформаторных двухтактных каскадов усиления мощности на комплементарных транзисторах.

### 3. Регуляторы в усилителях

В усилителях различного назначения обычно предусматривают регуляторы их параметров и характеристик.

#### 3.1. Регуляторы усиления

Регулировка усиления в заданных пределах достигается либо введением затухания с помощью резистивных делителей напряжения, либо посредством отрицательной обратной связи в усилительных ступенях. Варианты схем регуляторов обоих типов представлены на рис.19а и рис.19б.

В усилителях низкой частоты звуковоспроизводящих устройств нередко используют частотно-зависимые регуляторы громкости, обеспечивающие при пониженных уровнях громкости более естественное воспроизведение сигналов, чем при обычной регулировке. Такие регуляторы, называемые тонкомпенсированными, искусственно поднимают спектральные составляющие нижних и верхних частот при общем малом уровне звука. Схемы тонкомпенсированных регуляторов громкости приведены на рис.19в – рис.19д.

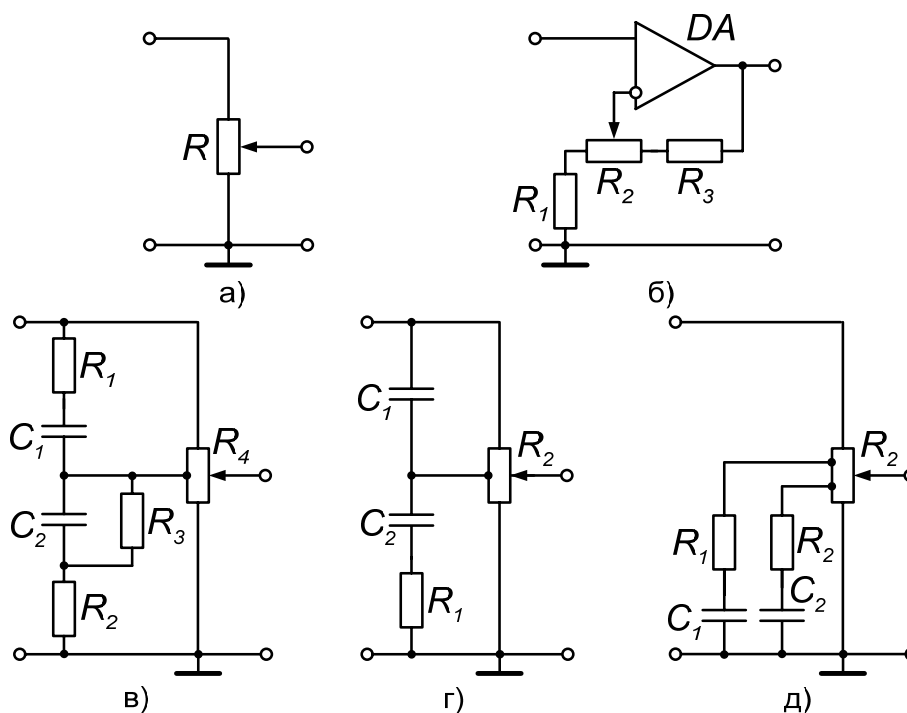


Рис.19 Схемы регуляторов усиления:

а) пассивный регулятор усиления,

б) активный регулятор усиления,

в) – д) тонкомпенсированные регуляторы громкости

### 3.2. Регуляторы частотных характеристик

Регулировку частотных характеристик в усилителях высокой частоты радиоприёмных устройств обычно осуществляют изменением резонансной частоты контуров с помощью переменных конденсаторов (рис.20).

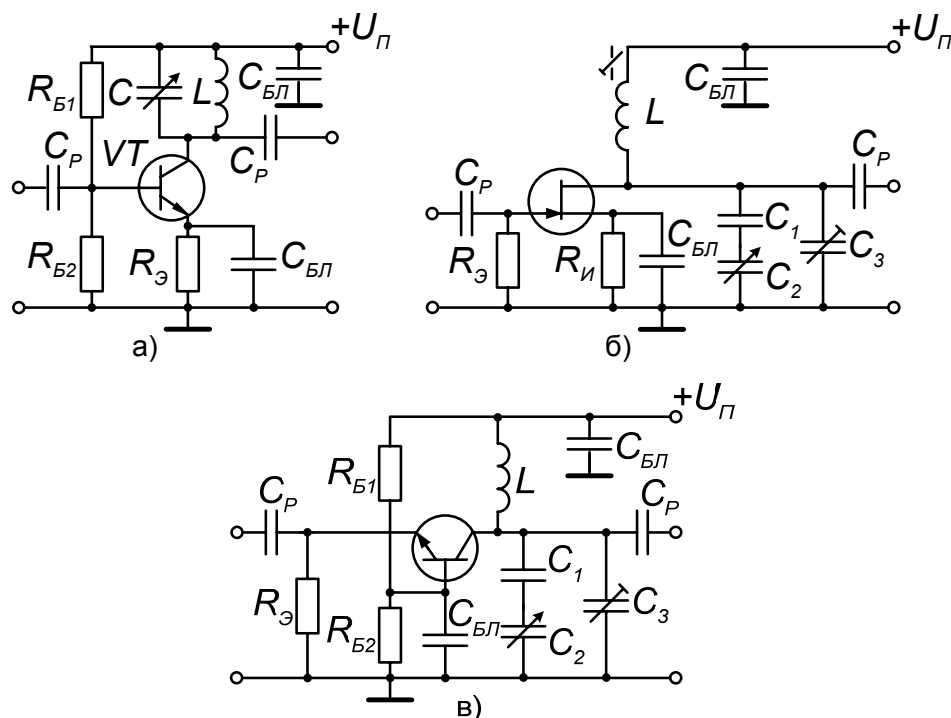


Рис.20. Схемы перестройки частоты резонансных усилителей:  
а), в) резонансные усилители на биполярном транзисторе,  
б) резонансный усилитель на полевом транзисторе

В усилителях низкой частоты звуковоспроизводящих устройств регулировку частотной характеристики – регулировку тембра звука осуществляют отдельной регулировкой уровня спектральных составляющих сигналов определенных частотных полосах. Для этого используют RC-цепи, которые в пассивных регуляторах тембра работают как частотно-зависимые делители напряжения, а в активных регуляторах тембра образуют звено частотно-зависимой отрицательной обратной связи. Примеры схем пассивных частотных корректоров нижних и верхних частот и пассивного регулятора тембра приведены на рис.21. Примеры схем активных регуляторов тембра даны на рис.22а. В многополосных регуляторах тембра, называемых эквалайзерами, используют активные регулируемые полосовые фильтры, центральные частоты полос которых разнесены на определённый интервал частот, например, на одну октаву. Пример схемы эквалайзера представлен на рис.22б.



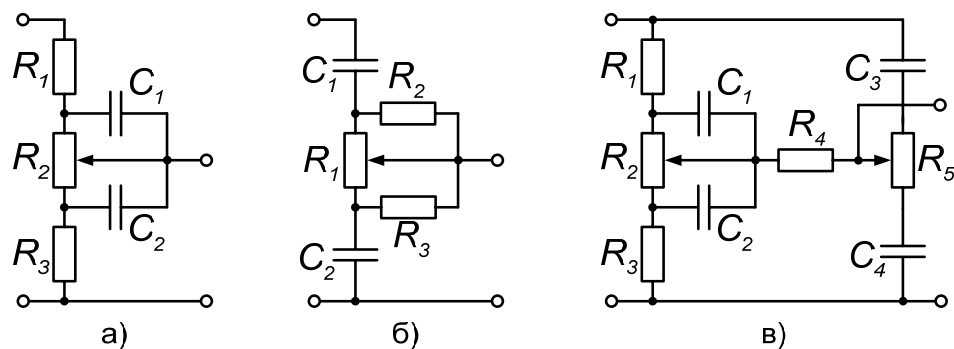


Рис.21. Схемы пассивных частотных корректоров:

- а) корректор нижних частот,
- б) корректор верхних частот,
- в) регулятор тембра

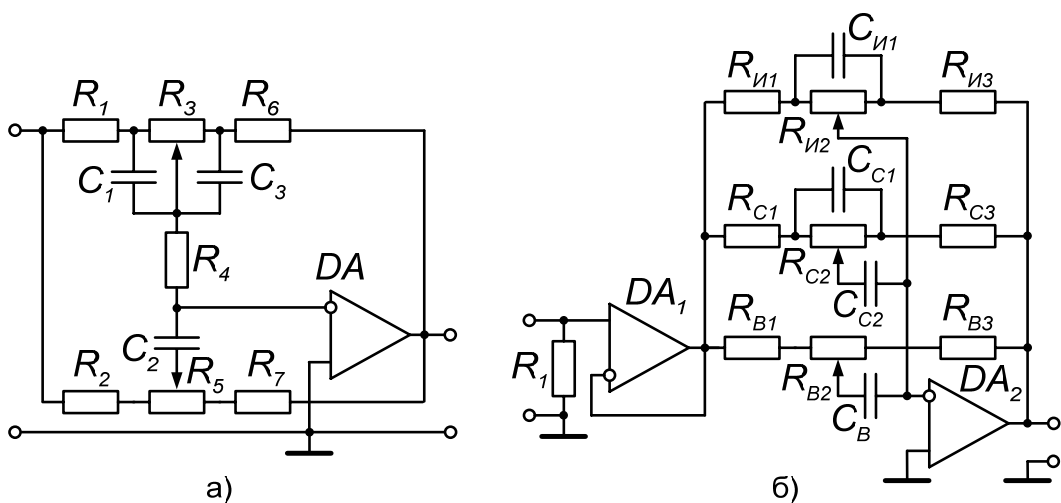


Рис.22. Схемы активных регуляторов тембра

### *Задание для самостоятельной работы*

Усвоить и запомнить способы регулировки усиления и частотных характеристик в усилителях звуковой частоты. Начертить схемы пассивных регуляторов громкости и регуляторов тембра.

## 4. Обратные связи в усилителях

*Обратной связью* называют явление, при котором результаты какого-либо процесса влияют на его ход. В усилителях это влияние выходного сигнала на процесс усиления или влияние напряжений и токов каскада на его режим покоя. Здесь самое широкое использование нашла *отрицательная обратная связь* (ООС). При глубокой ООС состояние системы с обратной связью и её коэффициент передачи сигнала определяются главным образом цепью обратной связи, а влияние элементов цепи прямой передачи сигнала, в том числе ЭП каскада, становится ничтожным.

В усилительных каскадах с помощью ООС обеспечивают стабилизацию режима покоя ЭП, например, в схемах, приведенных на рис.3.б) – рис.3.з).

Положительные качества каскадов с общим коллекторным электродом (повторителей), рассмотренных в п.2.2, каскадов с разделённой нагрузкой, рассмотренных в п.2.4 и каскадов на ОУ, рассмотренных в п.2.9 обусловлены присущей им глубокой ООС.

ООС используют в регуляторах усиления и регуляторах частотных характеристик усилителей (п.3). В радиоприёмных устройствах посредством ООС осуществляют автоматическую регулировку усиления радиосигналов и др.

В усилителях низкой частоты звуковоспроизводящих устройств ООС используют в каскадах усилителей-корректоров для формирования таких частотных характеристик усилителя, которые устраняют частотные искажения сигналов, обусловленные как частотными предыскажениями сигналов при их записи на носитель, так и частотными характеристиками головок, снимающих сигнал с носителя. Примеры схем усилителей-корректоров проведены на рис.23.

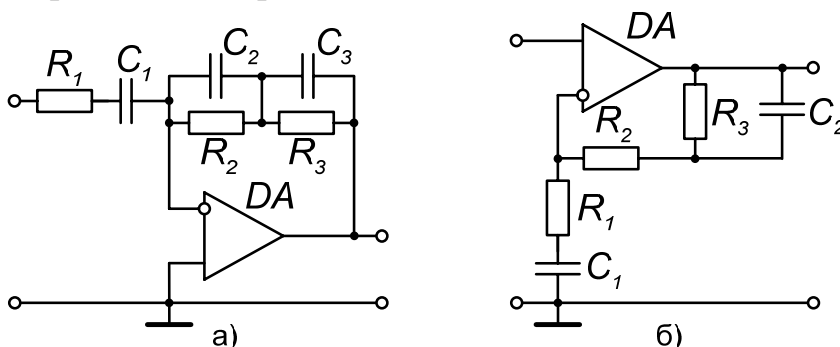


Рис.23.Схемы усилителей-корректоров частотных характеристик:

а) для проигрывателей грампластинок,

б) для магнитофонов

Наконец, ООС является самым эффективным средством стабилизации формы сигналов, т.е. средством борьбы с искажениями сигналов как линейными, так и нелинейными. Пример схемы усилителя, в

которой одна из цепей ООС обеспечивает стабилизацию режима покоя, а другая – стабилизацию формы сигнала, дан на рис.24.

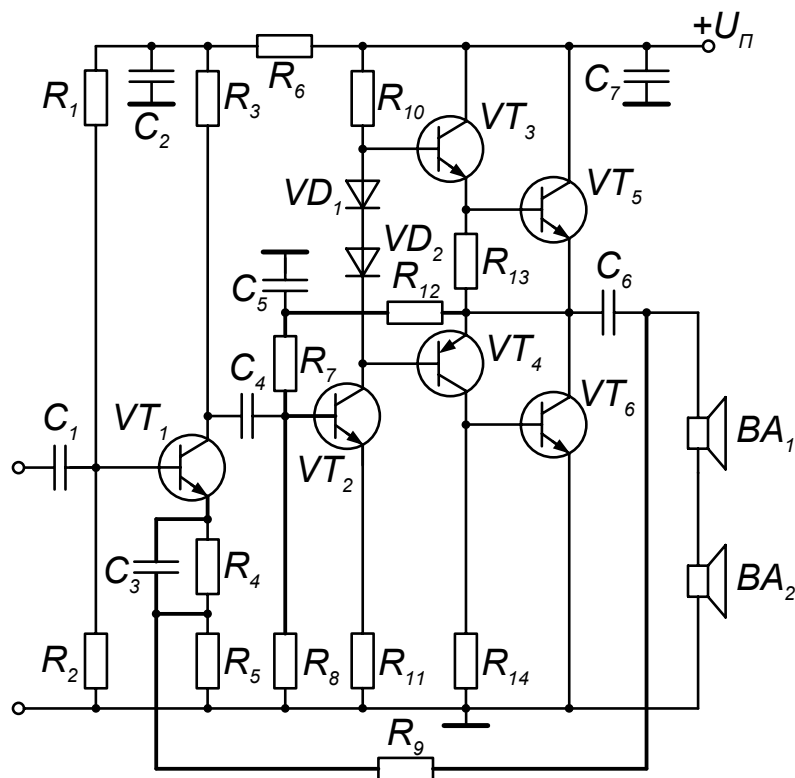


Рис.24. Схема усилителя сигналов звуковой частоты, охваченного ООС

### ***Задание для самостоятельной работы***

1. Усвоить понятие *обратная связь*. Усвоить и запомнить цели использования *отрицательных обратных связей (ООС)* в усилителях. Рассмотреть принципиальную схему усилителя, представленную на рис.24. Начертить её, определить в ней количество каскадов, их разновидности и назначение каждого элемента схемы. Указать элементы, обеспечивающие ООС в усилителе.

2. Начертить на листе формата А4 функциональную и принципиальную схемы усилителя звуковой частоты, в состав которого входят: тонкомпенсированный регулятор громкости; предварительный усилитель; регулятор тембра; двухкаскадный предоконечный усилитель и усилитель мощности (двухтактный повторитель на комплементарной паре составных транзисторов), охваченные ООС, стабилизирующей режим покоя и форму сигнала; акустическая система; источник питания, состоящий из силового трансформатора, выпрямителя и стабилизатора напряжения компенсационного типа.

## Список литературы

1. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс). Учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 1999. – 768 с
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем.- М.: Мир, 1983.- 512 с., ил.
3. Хорвиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х томах. Пер с англ. – М.:Мир, 1983. – Т 1. 598 с., ил.
4. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике: Пер с нем. – М.: Мир, 1991. – 446 с., ил.
5. Справочник по радиоэлектронным устройствам: в 2-х томах. Под ред. Д.П. Линде. – М.: Энергия, 1978. – 440 с., ил.- (Радиоэлектроника).
6. Чеботарёв В.И. Теоретические основы радиотехники. Часть 1: Учебн. пособие. – Харьков: ХГУ, 1989. – 100 с.
7. Чеботарёв В.И. Теоретические основы радиотехники. Часть 2: Учебн. пособие. – Харьков: ХГУ, 1990. – 104 с.

## Оглавление

	стр.
1. Состав усилительных каскадов.....	3
2. Основные схемы усилительных каскадов.....	9
2.1 Каскады с общим инжекторным электродом.....	9
2.2 Каскады с общим коллекторным электродом.....	10
2.3 Каскады с общим управляющим электродом.....	11
2.4 Каскады с разделенной нагрузкой.....	12
2.5 Каскодные усилители.....	13
2.6 Каскады с составными транзисторами.....	14
2.7 Дифференциальные каскады.....	14
2.8 Каскады на операционных усилителях.....	16
2.9 Оконечные каскады усилителей мощности.....	18
3. Регуляторы в усилителях.....	23
3.1 Регуляторы усиления.....	23
3.2 Регуляторы частотных характеристик.....	24
4. Обратные связи в усилителях.....	26
Литература.....	58

Учебно-методическое пособие

Чеботарёв Вадим Иванович  
Думин Александр Николаевич  
Ляховский Анатолий Федорович

## СХЕМОТЕХНИКА УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ